

Modeling and Thermal Management Analysis of Liquid-Cooled Energy Storage System

Jiangyue Liu¹ Yadong Wang² Yingwen Liu² Nairui Mao¹ Yuanmei Song¹

1. School of Mechanical and Vehicle Engineering Linyi University, Linyi, Shandong, 276000, China

2. Shandong Aode Shengkai Energy Co., Ltd., Linyi, Shandong, 276000, China

Abstract

With the rapid development of China's economy and the continuous rise in social electricity consumption, traditional distribution networks face the contradiction of peak-valley difference and the difficulties of dispatching management. Energy storage systems have become an important direction to solve this problem. This study systematically investigates liquid-cooled energy storage systems, demonstrating the feasibility of liquid cooling technology in large-capacity applications through theoretical modeling and thermal analysis. Using a 280Ah lithium iron phosphate battery assembled into a 1.066MWh liquid-cooled system, precise thermal modeling and optimized configuration enabled effective temperature control within the optimal range of $25^{\circ}\text{C} \pm 3^{\circ}\text{C}$ during 1C-rate discharge, with total heat generation of approximately 28kW. The research reveals that liquid-cooled systems exhibit significant advantages in heat dissipation efficiency, temperature control precision, and space utilization, providing reliable technical support for the safe and stable operation of large-capacity energy storage systems.

Keywords

liquid-cooled energy storage system; model assembly; thermal analysis calculation

基于液冷储能系统的建模与热管理分析

刘江跃¹ 王亚东² 刘英文² 毛乃睿¹ 宋圆美¹

1 临沂大学机械与车辆工程学院, 中国 · 山东 临沂 276000

2. 山东奥德圣凯能源有限公司, 中国 · 山东 · 临沂 276000

摘要

随着中国经济的高速发展和社会用电量持续攀升, 传统配电网面临峰谷差矛盾和调度管理的难题, 储能系统成为解决这一问题的重要方向。本文对液冷储能系统进行了系统性研究, 从理论建模到热分析计算, 论证了液冷技术在大容量储能系统中应用的可行性。通过使用280Ah磷酸铁锂电池组装成1.066MWh液冷储能系统, 通过精确的热模型计算和优化配置, 在1C倍率放电时系统总产热功率约28kW的情况下, 成功将电池工作温度控制在 $25^{\circ}\text{C} \pm 3^{\circ}\text{C}$ 的最佳范围内。研究表明, 液冷储能系统在散热效率、温度控制精度、空间利用率等方面均展现出了显著的优势, 为大容量储能系统的安全稳定运行提供了可靠技术保障。

关键词

液冷储能系统; 模型装配; 热分析计算

1 引言

随着当前中国经济的高速发展, 整个社会用电量攀升, 传统的配电网存在昼夜间, 季节间负荷差异较大的情况, 传统的“即发即用”的供电模式不断地显现出其缺陷, 每年的电网的谷电余量巨大导致其浪费, 解决电网峰谷差的矛盾已

【基金项目】山东省科技型中小企业提升计划项目（项目编号: 2024TSGC0872）及临沂大学大学生创新创业项目支持（项目编号: X2025104520635）。

【作者简介】刘江跃（2005-），男，中国重庆人，本科，从事能源动力研究。

成为国家能源局电力改革的重要方向^[1], 且电网调度管理的难度也在逐渐增大。而储能系统的搭建可以很好的解决这一问题, 当今国家电网使用储能系统来对电网进行调频、调峰, 解决余电的浪费已成为重要趋势。但储能系统也会有缺陷, 热失控正是储能系统最大的安全隐患, 尤其是在大规模的储能系统当中, 随着电池能量密度和运行环境复杂性的提升, 热失控的风险会更加显著^[2], 近几年我国储能系统的火灾事故频发, 造成了不小的经济财产损失。所以对储能系统的合理规划和分析显得尤为的重要。

为保证储能系统的安全运行, 设计一个合理的储能系统模型, 并对其进行热分析尤为关键, 目前常用的系统包含传统风冷和新型液冷型两种, 传统的风冷系统存在很多的弊

端, 如“木桶效应”即但储能系统当中, 单个电芯出现故障或容量衰减时会导致整个储能系统故障而容量输出也会异常。电芯会出现温差, 风冷散热是通过风扇将电芯产生的热量带走, 再通过空调集中带到系统的外部没有办法均匀快速的导出电芯的热量, 导致电池的电芯出现温差, 对整个系统的寿命和安全产生很大的影响。且占地空间大, 为保证风冷储能系统的散热有效, 同等容量的储能系统需要布置大量的风道和大功率的工业空调^[3]。液冷储能系统使用液冷技术通过液体对流换热, 将电池的热量带走来降低电池温度, 而液体(如水、乙二醇)的比热容和导热系数远高于空气, 可实现对电芯的精准、高效散热, 并且可显著延长电池寿命与系统性能, 且液冷系统优异的温控均匀性减少了电芯衰减, 提升全生命周期放电容量^[4]。且液冷系统结构紧凑, 能量密度高, 液冷管路体积远小于风道, 省去了庞大的内部风道空间, 使系统集成度大幅提升, 在相同容量下, 液冷储能系统的占地面积可减少 40% 以上。因此, 本文以先进的液冷储能系统为例, 通过实际建模设计电池组模型, 再通过经典储能电池数据和公式对模型进行简要的热分析并确定其可行性。

2 液态储能系统的设计

本文所涉及液冷储能系统的设计基于实际实施项目, 采用“电池包—电池簇—电池舱”三级架构, 并配置混合容量的储能设备。液态储能系统主要由电池包、电池簇、电池舱三个主要部分组成电池簇是由电池包组成的(如图 1), 左边为电池包, 中间为电池簇, 最右侧电池舱, 内有多个电池簇, 还有直流汇流箱、隔离变压器、交流配电柜等结构。同时, 在电池包里有散热片将电芯进行围绕, 同时为确保高效散热与温度分布的均匀性, 设计过程遵循了以下原则: 首先要遵循散热路径最短化原则, 通过优化导热界面以减少热阻; 第二要实施散热面积最大化原则, 增大散热片与电芯的接触面积通过增加散热鳍片或扩大液冷流道截面积以提升散热效率; 最后还要遵循热均衡原则, 通过合理布置热管理单元, 确保电池包内部温度场的均匀分布, 避免出现局部温度过高^[5]。本设计采用冷却介质为 50% 水与 50% 乙二醇混合液, 液冷板采用铝合金材质并设计为微通道流道, 通过导热界面与电芯底部贴合, 单簇有效换热面积约为 0.8m², 该设计直接关联后续牛顿冷却定律中的换热面积与温差计算, 旨在实现将电池工作温度控制在 25°C ± 3°C 的目标, 从而验证液冷系统在均匀散热与温度控制方面的有效性。



图 1 液冷储能系统示意图

3 电池组热模型的计算与液冷的可行性分析

我们采用经典的 280Ah 电池作为研究对象, 单体尺寸为 174mm × 54mm × 208mm, 单体标称电压 3.2V, 工作温度范围 -20°C 至 55°C, 最佳工作温度区间为 20°C 至 35°C, 将其装配起来组成电池簇, 作为核心的储能单元, 单个电池簇规格为 761.6V/280Ah, 额定容量 213.25kWh, 整个系统共配置 5 台电池簇, 总容量达到 1.066MWh。这种大容量的电池在充放电的过程当中会产生大量的热量, 需要做到及时有效的散热, 否则会导致电池温度的升高, 进而影响到电池的性能和寿命, 加速电池容量的衰减, 甚至会引发热失控导致火灾。

在充放电过程中, 电池的产热主要来源于内阻产生的焦耳热和电化学反应热。根据经典的电池热模型理论, 单体电池的产热功率可以表示为两部分之和, 即欧姆热和极化热与反应热的综合。280Ah 磷酸铁锂电池, 在 1C 倍率放电时电流为 280A, 其内阻约为 0.3mΩ。

由焦耳定律(1)得, 其中 Q 为单体电池的欧姆产热功率, I 为电流, R 为内阻, 即 $280^2 \times 0.0003 = 23.52\text{W}$ 。根据电池簇的电压配置, 利用公式(2)计算单体电池数量, 其中 n 表示单簇包含多少节电池, U_{pack} 表示电池簇电压, U_{cell} 表示单体电压, 即单簇包含 238 节单体电池 ($761.6\text{V} \div 3.2\text{V} \approx 238$ 节), 单个电池簇在 1C 放电工况下的总产热功率利用公式(3)进行计算, 其中 P_{total} 为总产热功率, Q_{cell} 为单体产热, n 为电芯数量, 即 $23.52 \times 238 = 5597.76\text{W}$, 约为 5.6kW。整个储能系统共有 5 个电池簇, 用公式(4)得, 其中 P_{system} 表示的就是总产热功率, P_{pack} 表示为单簇产热, N 表示为电池簇数量, 即总产热功率将达到 28kW 左右。

$$Q = I^2 \times R \quad (1)$$

$$n = \frac{U_{\text{pack}}}{U_{\text{cell}}} \quad (2)$$

$$P_{\text{total}} = Q_{\text{cell}} \times n \quad (3)$$

$$P_{\text{system}} = P_{\text{pack}} \times N \quad (4)$$

为了使电池的温度可控, 我们通过液冷系统对其进行散热, 冷却液为 50% 水与 50% 乙二醇的混合液, 其比热容约为 3.5kJ/(kg · K), 密度约为 1050kg/m³, 导热系数约为 0.4W/(m · K), 这种混合液相对空气具有优异的参数, 相对比空气的比热容仅为 1.005kJ/(kg · K), 导热系数仅为 0.026W/(m · K), 这更加证明了液冷系统比风冷系统具有更高的效率, 能够对电芯进行快速、均匀散热。

液冷板采用铝合金材质制作, 铝合金具有约 200W/(m · K) 的高导热系数, 能够快速将电池表面的热量传导至液冷板内部的流道中。液冷板内部采用微通道设计, 通过增加流道数量和优化流道布局来增大换热面积, 提高换热效率。每个电池簇配置专用的液冷板, 液冷板通过导热界面材料与电芯紧密接触, 由于单体电芯尺寸为 174mm × 54mm ×

208mm, 单节电芯底部面积 = $0.174\text{m} \times 0.208\text{m} = 0.036\text{m}^2$, 如果所有的 238 节电芯都与液冷板接触, 那么理论总面积 = $0.036 \times 238 = 8.57\text{m}^2$, 但在实际模型当中, 电芯之间包含间隙, 液冷板也不是和所有电芯都直接接触, 更具液冷储能工程的设计经验, 有效换热面积约为理论面积的 10%-15%, 也就是 0.8m^2 。牛顿冷却定律描述了固体表面与流体之间的对流换热过程, 其数学表达式为 (5), 同时在定律液冷系统的对流换热系数 h 约为 $1000\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$, 利用公式 (5), 其中 Q 为传热功率 W , h 为对流换热系数 2.3 数 $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$, A 为换热面积 m^2 , ΔT 为固体表面与流体之间的温度差 $^\circ\text{C}$ 。我们已经计算出了当个电池簇的散热需求其在 1C 放电工况下的产热功率约为 5.6kW , 单个电池簇配置的液冷板有效换热面积为 0.8m^2 , 液冷系统的对流换热系数 h 约为 $1000\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$, 为了将 5.6kW 的热量有效导出, 所得的温度差可通过公式 (5) 的变形公式 (6) 反推 $\Delta T = 7^\circ\text{C}$, 假设冷却液入口温度设定为 20°C , 那么电芯表面温度约为 27°C , 完全处于宁德时代磷酸铁锂电池 20°C 至 35°C 的最佳工作温度区间内。

$$Q = h \times A \times \Delta T \quad (5)$$

$$\Delta T = \frac{Q}{h \times A} \quad (6)$$

根据上述对液冷系统的精心设计和优化配置, 可以将电池工作温度精确控制在 $25^\circ\text{C} \pm 3^\circ\text{C}$ 的理想范围内, 这一区间刚好处于研究对象宁德时代磷酸铁锂电池的最佳工作温度范围, 对比传统的风冷系统可能出现 10°C 温差显著提升了温度的均匀性。可以有效延长电池寿命、提高系统的可靠性, 进而优化前面所提到的风冷储能系统的“木桶效应”。

并且从系统集成的角度来看, 液冷系统的结构更加紧凑、能量密度更高, 其液冷管路的体积远远小于风冷系统所需的风道空间, 省去了庞大的内部风道和大功率工业空调, 使得系统的集成度大幅度的提升, 在相同容量的条件下液冷储能系统可以有效的减少 40% 以上的占地面积。

综上所述, 基于 280Ah 电池的该液冷储能系统热模型

设计十分合理, 经过详细的热分析计算, 验证了该系统能够满足 1.066MWh 储能容量的散热需求。凸显了液冷技术高效的散热能力、精准的温度控制以及优异的温度均匀性, 为大容量储能系统的安全稳定运行提供可靠的技术保障, 奠定了储能系统向更高能量密度、更大规模方向的基础。

4 结语

本文对液冷储能系统进行了初步探索和研究, 先对整个液冷系统进行了理论建模再进行热分析计算, 证明了液冷技术在大容量储能系统中的应用可行性。对比于传统风冷系统, 液冷储能系统在散热效率、温度控制精度、空间利用率等方面均展现出显著优势, 很好的弥补了风冷储能系统的缺点。通过使用经典的 280Ah 磷酸铁锂电池组装成 1.066MWh 液冷储能系统, 进行了精确的热模型计算和优化配置, 成功将电池工作温度控制在 $25^\circ\text{C} \pm 3^\circ\text{C}$ 的最佳范围内, 相比风冷系统显著提升了温度均匀性。有效解决了传统风冷系统的“木桶效应”问题, 为电池全生命周期的安全稳定运行提供了可靠保障, 并且还可以有效的减少占地面积, 为液冷储能系统的工程化应用提供了理论依据和设计参考, 也为推动储能技术向更高能量密度、更大规模、更高安全性方向发展奠定了基础。未来, 随着液冷技术的不断优化和成本的进一步降低, 液冷储能系统将在构建新型电力系统、完成我国的“双碳”目标中发挥更加重要的作用。

参考文献

- [1] 董华佳,曾智勇,周厚国.智慧能源在储能领域的应用[J].环境技术,2018,36(05):92-95+109.
- [2] 王雅博,刘渊,李海龙,等.电池储能系统热管理现状综述[J].制冷与空调,2025,25(10):60-70+90.
- [3] 曾春保,李春生,李长成.液冷储能系统关键技术设计及应用[J].中国高新科技,2025,(06):63-65.
- [4] 吴超,王罗亚,袁子杰,等.液冷散热技术在电化学储能系统中的研究进展[J].储能科学与技术,2024,13(10):3596-3612.
- [5] 王乃新.新型锂离子储能系统散热结构优化设计[J].现代制造技术与装备,2025,61(07):32-34.